

## 3차원 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 5000 계열의 레이저 용접에서 공정 변수에 따른 용접 특성 분석

김동윤\*, 박영환\*\*<sup>✉</sup>

\*국립부경대학교 생산 및 자동화공학과, \*\*국립부경대학교 기계공학과

### Analysis of Weld Characteristics for Aluminum 5XXX Series Laser Welding Using 3-Dimension Remote Scanner

D. Y. Kim\*, Y. W. Park\*\*<sup>✉</sup>

\*Department of Manufacturing and Automation Engineering, Pukyong National University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

#### Abstract

The latest trends of vehicle technology development are fuel efficiency improvement, body designs declining air resistance and lightweight of materials. Especially, as lightened weight of materials makes engine efficient so that vehicles keep the best performance, it is the best way to protect the environment and reduce fuel consumption. In this study, we conducted laser welding by using 3-dimension remote scanner that is 5J32 aluminium alloy. Furthermore, conduction experiment that was 3 times repeated for changing factors such as observing angle, laser power and welding speed. we observed exterior and cross section of weled part and tensile strength. When increasing laser power and decreasing laser speed, tensile strength increased. In order to evaluate factors that affect tensile strength qualitatively we conducted ANOVA. We assumed that the factors are observing angle, laser power and welding speed. Then we found that laser power and laser speed affect tensile strength. We conducted evaluation of weldability of aluminium alloy by above ways.

**Keywords:** Laser welding(레이저 용접), 3-Dimension remote scanner(3차원 원격 스캐너), Aluminium alloy (알루미늄 합금), Lap(겹치기), Bead width(비드 폭), Bead height(비드 높이), Tensile strength (인장 강도), ANOVA(분산분석)

#### 1. 서론

최근 들어 심각한 환경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해 이미 선진국에서는 자동차 연비 및 배기가스 규제를 한층 심하게 강화하고 있다.

그리고 최근 자동차 관련 기술 개발의 동향은 자동차 연비 향상 및 공기 저항 감소를 위한 새로운 차체 디자인 및 재료의 경량화 등이 있다. 특히 차체의 경량화는 엔진 효율을 높여 자동차

성능향상을 극대화 시키고 연비향상을 도모 할 수 있으므로 환경오염 방지와 연료절감에 가장 효과적이고, 적합한 방법이다.

자동차 소재를 알루미늄 합금을 이용하여 차체를 경량화 하는 방법을 일반적으로 많이 사용한다. 알루미늄 합금은 경량화뿐만 아니라 비강도, 내식성, 열전도도 등이 우수하여 자동차용 재료로 사용되면 최고 40% 가량 경량화를 이룰 수 있으며, 종래 자동차 생산라인의 설비를 약간 혹은 그대로 사용할 수 있다는 장점으로 자동차 재료로서 알루미늄 합금의 구성 비율이 서서히 높아지고 있는 실정이다.<sup>1</sup>

그리고 자동차 산업현장에서 가장 큰 목표는

투고일 : 2011년 5월 1일 심사완료일 : 2011년 6월 19일

계재승인일 : 2011년 6월 21일

교신저자 : 박영환 ✉ parkyw@pknu.ac.kr

생산성과 품질향상이며, 열전도도가 높은 알루미늄 합금의 용접 시에 고밀도 에너지를 이용하여 빠른 용접 속도를 가지고 있는 레이저 용접 등이 적용되고 있다.<sup>2</sup>

이러한 점 때문에 실제 자동차 라인에서 스폿 용접과 아크 용접이 대부분을 차지하고 있지만 레이저를 접목 되거나 대체 되고 있는 실정이다.

그러므로 자동차 생산 공정에서 알루미늄 합금의 용접에 관해서 다양한 레이저 용접공정이 적용을 위하여 많은 연구들이 진행 중이다.

4kW급 Nd:YAG 레이저 헤드 및 로봇을 토대로 3차원 레이저 용접 시스템을 구축하고 용접 시스템에 대한 성능 시험 및 평가를 하였고,<sup>3,4</sup> CO<sub>2</sub> 레이저 원격 용접시스템을 이용하여 용접 패턴에 따른 용접 특성을 분석하고, 실제 용접에 적용하기 위한 최적 용접 조건을 조사 하였다.<sup>5</sup>

3차원 원격 스캐너 레이저 용접에 비해 Nd:YAG 레이저의 경우 3차원 정밀 구동의 한계를 가져 용접속도가 비교적 늦은 편이며, 작업 변경의 어려움을 가지고 있어 생산 유연성이 낮다. 앞에서 언급했듯이 자동차 산업 현장의 가장 큰 목표는 생산성이다. 3차원 원격 스캐너를 이용한 레이저 용접에서의 용접속도 향상에 따른 획기적인 생산성 향상 및 조립공정 축소에 따른 설치면적이 감소 할 것이며, 차체구조 변경 등 설계 유연성 확보에 따른 경량화 및 원가절감이 극대화 된다.<sup>6</sup>

그래서 본 연구에서는 3차원 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접 특성 평가를 실시하였다. 5000계열 알루미늄 소재인 5J32 판재의 자동차 차체 적용 가능성을 판단하기 위하여, 용접 공정변수인 레이저 출력, 용접속도, 그리고 조사 각도에 따른 용접 특성을 관찰하였다. 용접 특성에 있어서 용접비드의 외관 형상, 단면부, 인장 강도 시험 및 인장 강도에 대한 분산분석을 통하여 용접특성을 살펴보고 그 결과를 고찰하였다.

## 2. 레이저 용접 실험

### 2.1 용접 시스템 및 재료

레이저 원격용접 시스템의 원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 빔의 초점이 2개 축으로 회전할 수 있는 거울에 의해 시편 평면 내에 레이저 빔을 집속 시키는 방법을 사용한다. 로봇에 스캐너

와 레이저를 장착해 작업자가 원하는 지점에 동시다발적으로 레이저 용접을 하는 방식이다. 3차원 원격 스캐너 레이저 용접은 용접 시편의 면적에 레이저를 쏠 수 있는 스캐너를 로봇에 달아 멀리서 여러 용접 지점에 동시 다발적으로 레이저 용접을 할 수 있다. 저항 점용접 방식보다 5 배 이상의 용접속도를 향상시킨다.

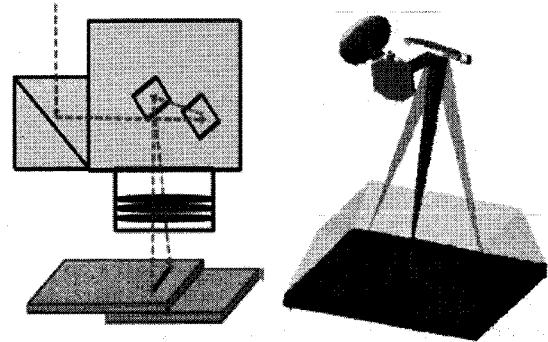


Fig. 1 Schematic diagram of laser scanner system.

실험에 사용된 레이저는 최대 출력이 4kW인 디스크 레이저(disk laser), 용접 헤드로는 스캐너(scanner)를 사용하였다. 판재로는 5000계열 알루미늄 합금 소재인 5J32의 두께는 1.6mm를 이용하였고, 화학적 조성은 Table 1과 같고, 용접 그루브(groove) 형상은 겹치기 용접을 실시하였다. 그리고 용접 시편으로는 Fig. 2의 형상이며 판재는 100mm × 125mm로 겹침의 길이가 40mm이며 용접 길이는 80mm로 용접을 실시하였다.

Table 1 Chemical composition of Aluminium alloy 5J32 (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
0.03	0.08	0.33	0.01	5.60	0.01	Bal.

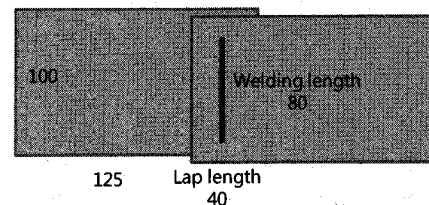


Fig. 2 Geometry of the specimen.

### 2.2 실험 조건

실험은 실험 계획법(design of experiment)에 의하여 진행되었다. 일반적으로 실험 계획법에 의해 사용되는 방법은 실험의 수를 줄이기 위해 다양

한 통계적 기법을 이용한다. 그러므로 직교 계획법(Orthogonal design)이나 심플렉스 계획법(simplex design), 중심합성 계획법(Central composite design) 등이 주로 사용된다. 그러나 이와 같은 실험 계획은 실험의 수는 줄일 수 있으나 실험 영역 상에서 결측치(missing value)가 발생하는 단점이 있다. 그러므로 전체 실험 영역에서 삼원배치법(3k factorial value)을 이용하여 전수 실험을 수행하였다. 실험은 조사각(angle), 레이저 출력(laser power), 용접속도(welding speed)를 변수로 사용한 용접 공정변수에 따른 용접성 평가실험을 실시하였다. 용접 공정 변수는 Table 2와 같다. Table 2에서 조사각도는 0, 8, 16°의 3수준으로 레이저 출력은 3, 3.5, 4kW의 3수준으로, 그리고 용접 속도는 3, 4, 5m/min의 3수준으로 설정하였다. 그러므로 총 용접 조건은 27개였으며, 반복 횟수는 3회로 하여 총 실험 횟수는 81회로 실시하였다.

3차원 원격을 이용한 레이저 용접 중 용접 공정 변수에 따른 용접성 평가를 하기 위하여 용접부의 단면 사진의 비드 모양을 이용하여 용접부 형상을 관찰하였다. 용접부의 상면 비드와 계면 비드, 그리고 이면 비드의 폭을 측정 하였고, 용입 깊이를 측정하였다. 그리고 용접부의 강도를 측정하기 위하여 인장 시험을 수행하였으며, 인장시험에 대한 요인의 유의 수준을 알아보기 위하여 용접 공정변수에서의 분산분석을 실시하여 요인에 대한 유의 수준을 확인 하였다.

**Table 2** Laser welding experiment conditions

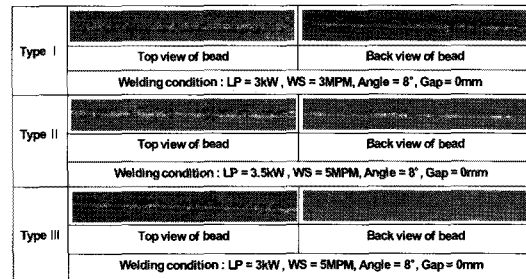
Levels	0	1	2
Laser power (kW)	3	3.5	4
Welding speed (m/min)	3	4	5
Angle (°)	0	8	16

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 용접부 외관 및 단면 사진

3차원 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접에서 용접 조건에 따른 용접부 외관 형상을 확인 하였다. Fig. 3은 용접 공정 변수에 따른 비드 외관을 상면 비드와 이면 비드로 구분하여 나타내었다. 용접의 비드형상을 크게 3가지 형태로 분류하였다. Type I의 경우는 모재에 대한 용접 입열량이 충분한 경우로 상면 및 이면 비드가 매

끄럽게 형성되었다. Type II의 경우는 모재에 대한 용접 입열량이 충분하지 않은 경우로 상면 비드는 매끄럽게 형성되었지만, 이면 비드의 경우 불규칙적으로 형성 되었다. Type III의 경우 모재에 대한 입열량이 매우 적어 상면 비드는 형성이 되지만, 이면 비드는 전혀 형성 되지 않았다.



**Fig. 3** Type of bead shape at different welding conditions.

3차원 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접에서 용접 조건에 따른 용접부 단면 사진을 Fig. 4에 표시 하였다.

단면 사진 밑에 Type I은 Fig. 3에서 분류된 비드형상의 유형을 의미한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 대부분의 경우에서 기공이 발생하였다. 알루미늄 합금 용접 시 기공이 발생하기 쉽다. 주된 발생 원인은 수소로 모재에서 용해된 수소 원이나 모재에 흡착된 수분과 유기물의 부식생성물, 보호 가스 중의 수소와 수분, 그리고 보호가스가 불완전한 경우 공기 중의 수분일 수도 있다. 알루미늄 합금 5J32의 주요 합금 원소인 마그네슘의 비등점(boiling point)이 알루미늄 보다 낮은 용접 중에 기화하여 공기 중으로 빠져 나가지 못하고 비드에서 같이 응고하여 기공 발생 된다.<sup>7</sup>

그리고 레이저 출력 4kW의 경우 용접속도에 무관하게 용접부 외관으로 분류한 Type I의 경우로 모재에 입열량이 충분하다는 것을 확인 할 수 있으며, 용접속도가 증가 할수록 Type II,III의 경우가 발생한 것으로 보아 입열량이 충분하지 못하였다. 또한 비드의 형상은 레이저 조사각 (8, 16°)의 따라 비스듬하게 기울어 졌음을 알 수 있다.

#### 3.2 용접부 비드 형상

알루미늄 레이저 용접에서 공정변수에 따른 용접 특성을 관찰하기 위하여 Fig. 5,6과 같은 방법으로 비드의 높이와 폭을 측정 하였다.

Fig. 7은 용입 깊이 및 상면 비드의 높이 이면 비드의 깊이를 나타내고, Fig. 8의 경우 비드의 폭을 나타낸다. 용입 깊이의 경우 용접 시편의 총 두께 3.2mm보다 큰 경우 완전 용입(full penetration)이 일어난 경우이며, 이면비드의 깊이가 형성되었다. 그리고 용입 깊이가 3.2mm를 넘지 못할 경우 불완전 용입이 발생 했다는 것을 알 수 있으며, 불완전 용입이 발생하면 상면 비드의 단면에 덧살이 형성되는 것을 확인 할 수 하였고, 이면 비드의 깊이는 형성되지 않았다.

완전 용입이 일어나는 조건은 레이저 출력이 4kW일 경우 조건 모두에서 일어나고, 3.5kW는 4조건, 3kW는 2가지의 조건으로 Fig. 3에서 Type I의 경우에 대하여 상면 비드 높이가 음의 값을 갖는다. 반면 이면 비드의 깊이는 모두 0보다 크며, 이를 통해 전체적으로 비드가 아래로 처짐을 알 수 있다. 입열이 충분하지 못한 Type II의 경우 용접 속도에 따라 영향을 받았다. 용접속도가 적으면 비드의 폭이 커져 비드가 아래로 처지는 현상을 확인 할 수 있었고, 용접속도가 증가하면 비드 폭이 좁아져 상면 비드의 높이가 양의 값을 가지며, 덧살이 형성 되었다. 입열이 매우 적은 Type III의 경우 용입 깊이가 3.2mm보다 적은 경우로서 이면 비드의 깊이가 0의 경우였다. 이 경우는 모두 상면 비드 높이가 0보다 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 키홀(keyhole)이 모재를 관로하여 완전 용입이 이루어지지 못하고 기공 등에 의해 많은 양의 용융 금속이 상면 위로 쌓이기 때문에 덧살이 형성됨을 알 수 있다.

비드 폭의 경우, 전체적으로 용접 속도가 감소할수록 레이저 출력이 커질 수로 증가하고 있다. 특징적으로 완전 용입이 일어나는 경우 계면에서의 비드 폭은 1.45mm이상이 됨을 알 수 있다. 그리고 계면 비드의 폭이 커지면 이면 비드의 폭도 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 상면 비드의 폭과 계면 비드의 폭은 무관하였다.



(a) Penetration depth



(b) Top bead height



(c) Back bead depth

Fig. 5 Measurement of bead height.

	Angle = 0°			Angle = 8°			Angle = 16°		
	3kW	3.5 kW	4 kW	3kW	3.5 kW	4 kW	3kW	3.5 kW	4 kW
Speed = 3 m/min									
	Type I	Type I	Type I	Type I	Type II	Type I	Type II	Type II	Type I
Speed = 4 m/min									
	Type III	Type I	Type I	Type III	Type I	Type I	Type III	Type I	Type I
Speed = 5 m/min									
	Type III	Type II	Type I	Type III	Type II	Type I	Type III	Type II	Type I

Fig. 4 Photo of cross section according to welding conditions.

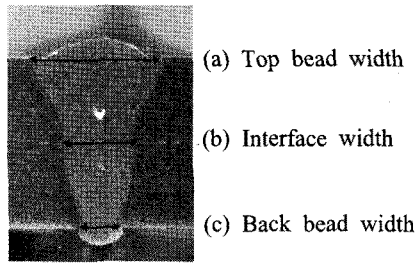
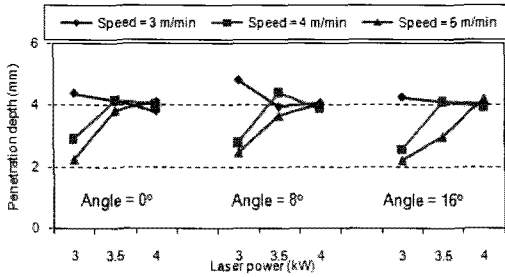
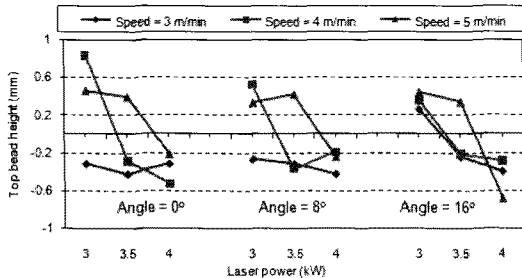


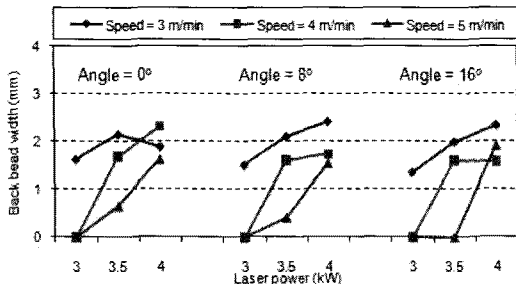
Fig. 6 Measurement of bead width.



(a) Penetration depth according to welding conditions



(b) Top bead height according to welding conditions

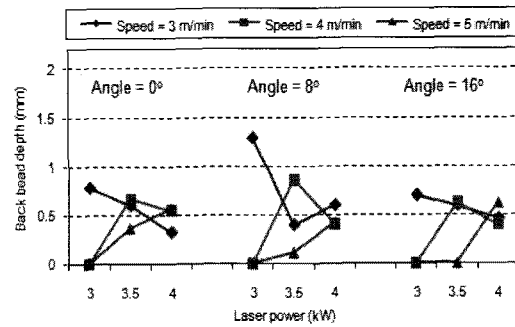


(c) Back bead depth according to welding conditions

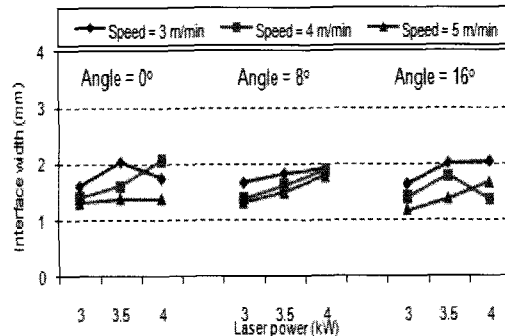
Fig. 7 Bead height according to welding conditions.

### 3.3 인장강도

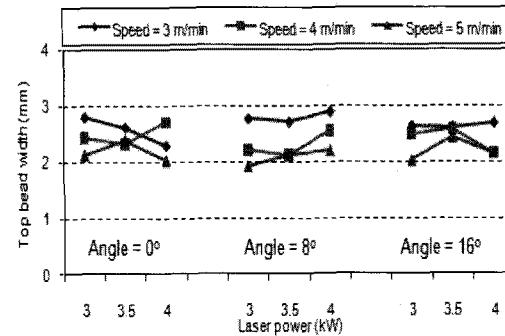
알루미늄 5J32에 대한 원경 레이저 용접의 공정 변수에 대한 기계적 특성을 알아보기 위하여 전단 인장강도 시험을 실시하였다. 시험은 기존의 용접방법인 저항 점 용접과의 전단 인장 강도를 비교하기 위하여 저항 점 용접의 시험의 방법인 KS B 0851 (저항 점 용접 및 프로젝션 용접 이음의 전단시험에 대한 시험편 치수 및 시험 방법)로 시험 시험편을



(a) Top bead width according to welding conditions



(b) Interface width according to welding conditions



(c) Back bead width according to welding conditions

Fig. 8 Bead width according to welding conditions.

Fig. 9와 같이 제작하였다. 시험의 신뢰성 확보를 위해 Fig. 2의 실험 시험편을 Fig. 9와 같이 중앙부를 절단하여 항상 일정한 시험편을 제작하였으며, 3회 반복 실험을 수행하였다.

용접부의 강도 적정성을 판단하기 위하여 ISO 규격 KS B ISO14373(저항 용접- 비도금 및 도금 저탄소강의 점용접 절차)을 이용하여 허용 인장 강도를 선정하였다. 일반적으로 사용되는 차체 용접의 경우 저항 점 용접으로 수행된다. 그러므로 본 실험의 전단 인장 실험의 결과가 기존의 용접 방법인 저항 점 용접의 전단 인장 강도 기준보다 높게 나오는 것으로 용접부의 강도 기준을 삼았다. 특히 본 연구에서는 너깃의 형성이 없기 때문에

Table 3 ANOVA for tensile strength about welding parameters

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F0	F(0.05)
Angle	965411.31	2	482705.65	2.08	3.13
Power	148690874.37	2	74345437.18	<b>320.72</b>	<b>3.13</b>
Speed	65233146.06	2	32616573.03	<b>140.70</b>	<b>3.13</b>
Angle × Power	996111.47	4	249027.87	1.07	2.51
Angle × Speed	422105.34	4	105526.33	0.45	2.51
Power × Speed	18646566.93	4	4661641.73	20.11	2.51
Angle × Power × Speed	1758982.79	8	219872.85	0.95	2.07
Error	12517368.32	54	231803.12		
Total	249230566.59	80			

너짓의 크기가 아닌 용접 강도를 선택 하였다. KS B ISO14373에서 제시된 저탄소강의 최소 용접 전단 강도 크기인 공칭지름에 대한  $5\sqrt{t}$ 에 대한 7,400(N)을 용접 강도기준으로 선정 하였다.

인장 시험의 신뢰성을 확보하기 위하여 3회 반복 시험에 대한 인장 시편을 모두 채취하고 인장 시험 데이터를 구한 후 평균값을 구하여 Fig. 10에 그 결과를 나타내었다. 레이저 출력이 커지고, 용접 속도가 감소할수록 인장 강도는 증가하였다. 그 이유는 레이저 출력이 증가 하고, 용접 속도가 낮아질수록 모재에 대한 입열량이 충분하게 되어 비드의 깊이 나 폭이 커지기 때문이다. 그리고 조사각도가 커질수록 약간 증가하는 경향을 가졌는데 비드가 경사를 지게 되면서 폭이 커져 인장강도가 커지는 것으로 사료된다. 레이저 출력이 4kW일 때는 용접속도에 상관없이 허용인장강도를 만족하였다.

Fig. 11은 인장 강도 시험 시 파단 형태이다. 파단은 크게 용접부 혹은 HAZ부 파단이 난 형태와 용접부 중간 계면에서 파단이 일어난 계면 파단의 형태로 나뉘게 된다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 인장 강도가 9,000(N)이상일 경우에 용접부 파단을 확인 할 수가 있었다. 이를 통하여 9,000(N)이상에서 적정 용접 구간이 형성됨을 알 수 있다.

3.4 분산분석

각 공정변수가 용접 특성에 얼마나 큰 영향을 주는 지를 정량적으로 파악하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 분산분석이란 실험 결과의 제곱 합(sum of square)을 인자(factor), 오차(error)와 교호작용(interaction)을 포함한 요인(source)별로 분해하고, 오차에 대한 각 요인간의 비(ratio)를 통하여 결과에 대한 영향력을 규명하는 분석법이다. 인장 강도에 대한 분산 분석은 Table 3과 같다. angle은

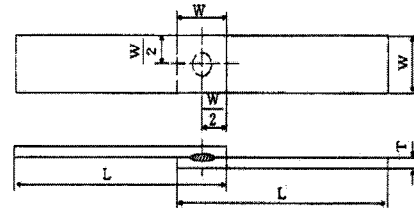


Fig. 9 The shape of test piece.

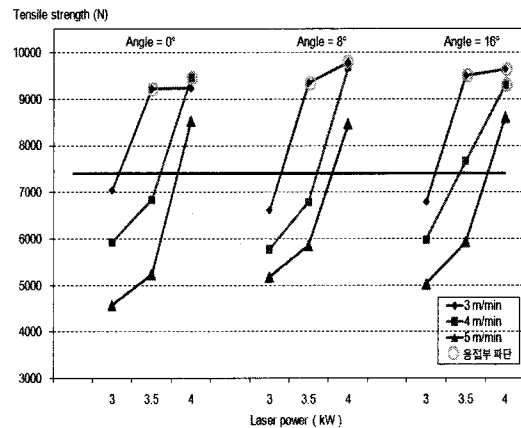
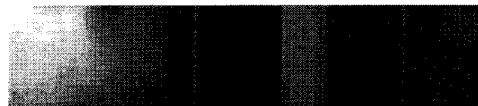


Fig. 10 Result of tensile test.



(a) Fracture at weld of HAZ



(b) Fracture at interface

Fig. 11 Fracture types after tensile test.

조사각도, power는 레이저 출력을, 그리고 speed는 용접 속도를 의미한다. 분산분석에서 '×'는 교호작용을 의미한다. 교호 작용이란 인자 수준의 조합에서 일어나는 효과를 의미한다. F0는 평균 제곱의 비로서 에러의 평균 제곱에 대한 인자의 평균 제곱의

비로서 나타내고, 이 값이 클수록 영향력이 크다는 것을 의미한다. 그리고  $F(0.05)$ 는 F-검정(F-test)의 유의 수준(level of significance)을 나타내는 것으로 99.5%의 유의 수준을 의미한다. 그러므로  $F_0$ 가  $F(0.05)$ 보다 큰 경우, 요인이 결과에 영향을 주는 인자라는 것을 통계적으로 검증하게 된다. Table 3은 인장 강도에 대한 분산분석의 결과다. Table 3에서 보는 바와 같이 레이저 출력이 인장강도에서 가장 큰 영향력을 가지고 있음을 알 수 있다.

그리고 용접속도도 통계적으로 유의한 인자라고 할 수 있다. 레이저 출력과 용접속도와의 교호작용이 있음을 알 수 있다. 이것은 레이저 출력이 증가 할수록 입열이 증가되는 요소이지만 용접 속도가 증가할수록 입열을 감소시키는 요인으로 작용하기 때문이다. 이외의 요인들은 인장 강도에 크게 영향을 주고 있지 않다는 사실을 분산분석표로 알 수 있다.

#### 4. 결론

3차원 원격 스캐너를 이용하여 5000계열 알루미늄 합금인 5J32의 겹치기 용접에서의 공정변수에 따른 용접성 평가 실험을 실시하였다.

그리고 3차원 원격 스캐너의 가장 큰 장점인 조사각도에 의하여 각도의 변화에 따라 비드가 경사를 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

알루미늄 5J32의 기계적 특성을 알아보기 위하여 인장강도 시험을 실시하였다. 레이저 출력이 높고 용접 속도가 낮은 경우 입열이 많아 허용 인장 강도를 만족하였으며, 9,000(N)을 넘었을 경우 용접부 파단이 발생하였다.

각 공정 변수가 인장강도에 얼마나 큰 영향을 주는지 정량적으로 평가하기 위하여 분산분석을 실시한 결과 레이저 출력이 인장강도에 가장 큰 영향력을 미치고 있었으며, 용접속도도 통계적으로 유의한 인자였음을 알 수 있었다. 그리고 레이저 출력과 용접 속도의 교호 작용도 발생하는 것을 확인하였다.

#### 후 기

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0003259).

#### References

- 1) Y. H. Chung, "Aluminum alloy products for automobile use," Journal of Korea Society of Automotive Engineers (KSAE), Vol. 18, No. 5, pp. 38-52, 1996.
- 2) E. Schubert, M. Klassen, I. Zemer, C. Walz and G. Sepold, "Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, pp. 2-8, 2001.
- 3) B. H. Jung, M. Y. Lee, H. Suh, and H. S. Kang, "Development of 3D laser welding Technology for Automobile body," Proceedings of the Spring Annual Meeting of KWS, Vol. 44, pp. 226-228, 2005.
- 4) H. S. Kang, H. Suh, J. H. Lee, M. Y. Lee and B. H. Jung, "Development of 3D Laser Welding System," Proceedings of the Spring Annual Meeting of KSPE, pp. 932-935, 2005.
- 5) J. Suh, M. Y. Lee, B. H. Jung, M. J. Song, H. S. Kang and J. O. Kim, "Remote Welding of Automobile Components using CO<sub>2</sub> Laser and Scanner," Journal of the Korean Welding and Joining Society, Vol. 26, No. 5, pp. 74-78, 2008.
- 6) L. Rauschdorf, M. Lingner, "Remote welding in the industrial manufacturing," EALA, pp. 310-330, 2005.
- 7) J. H. Kim, D. H. Park. "Porosity in thick Aluminum alloy welds," Journal of the Korean welding Society, Vol. 12, pp. 7-15, 1994.